

На правах рукописи



Макаров Алексей Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЛИТЕЛЬНО СТОЯЩИХ ВОД НА
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Краев Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: **Сахаров Игорь Игоревич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет», профессор кафедры «Геотехника»

Артюшенко Игорь Александрович
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Российский университет
транспорта», доцент кафедры «Проектирование
и строительство железных дорог»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Дальневосточный
государственный университет путей
сообщения»

Защита диссертации состоится «17» марта 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д.2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «09» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из важных факторов, влияющих на стабилизацию температурного режима грунтов *земляного полотна* (ЗП) и многолетнемерзлого основания *автомобильных дорог* (автодорог), является образование термокарстовых процессов вдоль дорог. *Многолетнемерзлые грунты* (ММГ) основания под теплоизолирующим влиянием ЗП автодороги подвержены консолидации. При оттаивании грунты основания сжимаются под ЗП автодороги, тем самым формируются подтопляемые пониженные места вдоль откосов. Вследствие подтопления придорожных полос и откосов дороги в тело ЗП проникает вода, вызывая криогенные процессы в конструкции ЗП и основания дороги. В большинстве случаев скопившаяся вода вдоль откосов дорог находится круглогодично в талом и мерзлом состоянии, что соответствует определению *поверхностных длительно стоящих вод* (ПДСВ). Влияние таких вод может быть разным в зависимости от климатических, инженерно-геологических условий участка дороги на ММГ. На таких участках следует выполнять индивидуальный анализ и подход при разработке *конструктивно-технологических решений* (КТР), направленных на стабилизацию температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

Степень разработанности темы исследования. Вопросом стабилизации температурного режима ЗП и основания автомобильных и железных дорог на ММГ занимались и занимаются: Цернант А.А., Золотарь И.А., Малышев А.А., Дубина М.М., Пассек В.В., Шуваев А.Н., Кондратьев В.Г., Михайлов Г.П., Жданова С.М., Дыдышко П.И., Панова М.В., Бедрин Е.А., Chi Zhang, Jing Sun и др.

Изучением теории теплопроводности и тепловых процессов занимались и занимаются: Кудрявцев В.А., Ершов Э.Д., Головкин М.Д., Лукьянов В.С., Лыков А.В., Хрусталева Л.Н., Кроник Я.А., Горелик Я.Б., Парамонов В.Н., Сахаров И.И., Кудрявцев С.А., Romanovsky V.E., Lunardini V.J. и др.

Объект исследования: грунты ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ.

Предмет исследования: температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ.

Цель исследования: разработать методику прогноза и КТР по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ.

Задачи диссертационного исследования:

1. Проанализировать и обобщить имеющийся отечественный и зарубежный опыт по стабилизации температурного режима ЗП и основания автодороги на ММГ.

2. Исследовать температурный режим натурной конструкции ЗП и основания автодороги на ММГ при влиянии ПДСВ.

3. Разработать КТР, направленное на стабилизацию температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии.

4. Разработать методику расчета для прогноза процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ вод, с учетом воздействия КТР.

5. Верифицировать результаты расчетов процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания по предложенной методике с результатами численного моделирования и экспериментальными данными натуральных наблюдений участка автодороги на ММГ при влиянии ПДСВ.

6. Экспериментально-теоретически обосновать геометрические параметры элементов предлагаемого КТР и оценить их влияние на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги при влиянии ПДСВ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Теоретически и практически установлено влияние ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

2. Разработано КТР для сохранения грунтов основания ЗП в мерзлом состоянии при влиянии ПДСВ, с последующей температурной стабилизацией грунтов геотехнической системы «ЗП-основание».

3. Разработана методика расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с учетом воздействия КТР.

4. Экспериментально-теоретически обоснованы геометрические параметры КТР.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в разработке КТР по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии;

– в предложении методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, позволяющей учитывать воздействие КТР;

– в экспериментальном обосновании эффективности разработанного КТР для сохранения грунтов основания ЗП в мерзлом состоянии при влиянии ПДСВ.

Результаты исследований внедрены на автомобильной дороге «Сургут-Салехард, участок Новый Уренгой – Надым I пусковой комплекс: п.Пангоды (км870) – п.Правохеттинский (км936)» Участок ПК594+00 – ПК594+90»; на экспериментальном участке автомобильной дороги «Устье-Кемпедяй» согласно письму ООО «ТИП-ИК-1» № 29/10-20 от 08.10.2020 г.

Методология и методы исследования:

– анализ существующих методов стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания на основе отечественного и зарубежного опыта инженеров-геотехников;

– экспериментальные натурные исследования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания участка автодороги на ММГ при влиянии ПДСВ;

– экспериментальные лабораторные исследования на маломасштабном стенде температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с внедрением разработанного КТР;

– численные и аналитические расчеты влияния ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания методом конечных разностей и аналитическим методом, представленным решением Стефана.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты натурных экспериментальных исследований температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания участка автодороги п.Пангоды – п.Правохеттинский при влиянии ПДСВ;

– КТР, стабилизирующее температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии;

– методика расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, позволяющая учитывать воздействие КТР;

– результаты верификации методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с численным моделированием и экспериментальными данными натурных наблюдений участка автодороги п.Пангоды – п.Правохеттинский при влиянии ПДСВ;

– результаты экспериментальных лабораторных исследований на маломасштабном стенде температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с учетом разработанного КТР.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

– соблюдением законов теплофизических процессов при составлении методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ;

– объемом данных экспериментальных натурных исследований при использовании поверенного контрольно-измерительного оборудования;

– сериями экспериментального моделирования в лабораторных условиях при использовании поверенного контрольно-измерительного оборудования;

– сравнением результатов расчета по предлагаемой методике с данными натурных экспериментов, лабораторных экспериментальных исследований, с численным моделированием в сертифицированной программе для ЭВМ и результатами исследований других авторов.

Апробация работы: положения работы были доложены на международных геотехнических и научно-практических конференциях ТюмГАСУ, ТИУ (г.Тюмень, 2015, 2017, 2018г.г.), СПбГАСУ (г.Санкт-Петербург, 2019, 2021г.г.) и симпозиуме в

Южно-Сахалинске (2018г.); всероссийской научно-технической конференции «Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений» (г.Томск, 2021г.).

Личный вклад соискателя состоит в разработке КТР по стабилизации температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии; планировании и реализации экспериментальных натурных и лабораторных исследованиях, численных экспериментов; в разработке методики расчета процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ, с учетом воздействия КТР; в обосновании экспериментально-теоретическим способом геометрических параметров КТР.

Публикации. По теме диссертационного исследования получен патент на изобретение и опубликовано 7 статей, 3 из них в журналах, соответствующих требованиям ВАК.

Объем и структура работы. Структура диссертационной работы представлена введением, четырьмя главами, заключением, списком литературы и приложениями. В объём работы входит 156 страниц напечатанного текста, 77 рисунков, 18 таблиц, 96 источников литературы.

Специальность, которой соответствует диссертация. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения по пунктам 5, 11, 12.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнялся анализ нормативной литературы, трудов отечественных и зарубежных ученых, а также опыт строительства и эксплуатации автодорог в Арктической зоне, указывающий на нерешенные проблемы и задачи в обеспечении надежности эксплуатации линейных сооружений на подтопляемых территориях.

В результате предложено исследовать в натурных условиях температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ и предложить методику прогноза величины промерзания-оттаивания геотехнической системы «ЗП-основание» с последующей разработкой КТР, позволяющего ограничить тепловое влияния ПДСВ через откосную часть ЗП с сохранением притока холода в зимний период через основную площадку ЗП в основание. На основании вышеизложенного определены цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приведено описание натурных исследований температурного режима участка автодороги на ММГ при воздействии ПДСВ вдоль откосов ЗП.

В рамках диссертационной работы объектом натурального исследования были приняты грунты ЗП и основания участка автодороги «п.Пангоды (км877+210) – п.Правохеттинский (км877+300), ПК594+00 – ПК594+90» III категории с высотой ЗП равной 2,0м.

На данном участке условия поверхности стока неудовлетворительные. ПДСВ

подтопляли южный и северный откосы ЗП. Средняя глубина ПДСВ составляла 1,20м.

На рассматриваемом участке дороги было зафиксировано формирование циклических деформаций периодом 1 год, выраженных в виде поперечных и продольных трещин на покрытии проезжей части и вертикальных перемещений обочины. Максимальное раскрытие поперечных трещин 75мм, продольных – 170мм. Среднее значение вертикальных перемещений составляло 200мм. Приращение вертикальных перемещений за 2010-2011г. составило 30мм.

При выявлении причин формирования циклических деформаций были выполнены инженерно-геологические изыскания на рассматриваемом участке дороги. Под южным откосом ЗП была выявлена таликовая зона. Верхняя граница ММГ под южным откосом ЗП располагалась на глубине 3-ех метров от дневной поверхности, под северным откосом – на глубине 0,7м. Температура верхней кровли ММГ под южным откосом ЗП на первую декаду октября 2011г. составила минус 0,6°С. Конструкция дороги в поперечном направлении оперта на неоднородное основание. В результате возникают неравномерные осадки основания дороги с южной части со смещением конструкции ЗП в сторону откоса. При смещении конструкции ЗП на покрытии дороги образуются трещины.

На основании серии численных экспериментов по прогнозу температурного режима грунтов многолетнемерзлого основания и конструкции автодороги при воздействии ПДСВ вдоль откосов ЗП была сформирована гипотеза, основанная на идее ограничения теплового влияния ПДСВ через откосную часть ЗП с сохранением притока холода в зимний период через основную площадку ЗП в основании.

Автором диссертационной работы было разработано и внедрено КТР по усилению откосной части грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания рассматриваемого участка дороги, с сохранением существующей конструкции дорожной одежды и ЗП. (см. рис. 1).

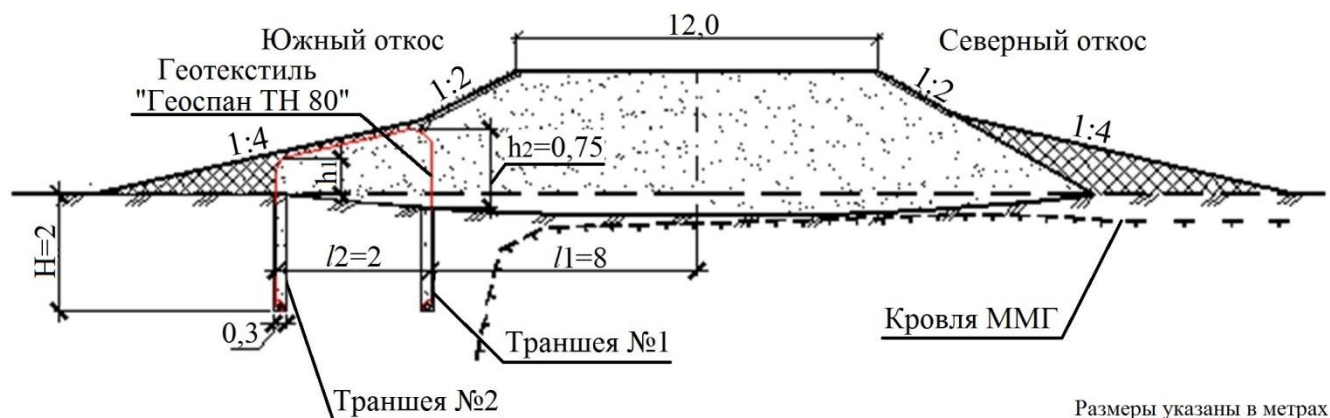


Рисунок 1. Схема КТР в конструкции ЗП на рассматриваемом участке дороги

Выполнено вертикальное армирование геотекстилем южной части основания и откоса ЗП. В откосе ЗП формировалась грунтовая призма трапецеидального сечения, обтянутая геотекстилем. В основании ЗП геотекстиль закреплялся полиэтиленовой трубой (см. рис. 2). Заложение откоса призмы соответствовало заложению откоса ЗП. Применение армирующего

материала позволило снизить воздействие ПДСВ на грунт ЗП и дальнейшее развитие осадок грунтов основания.

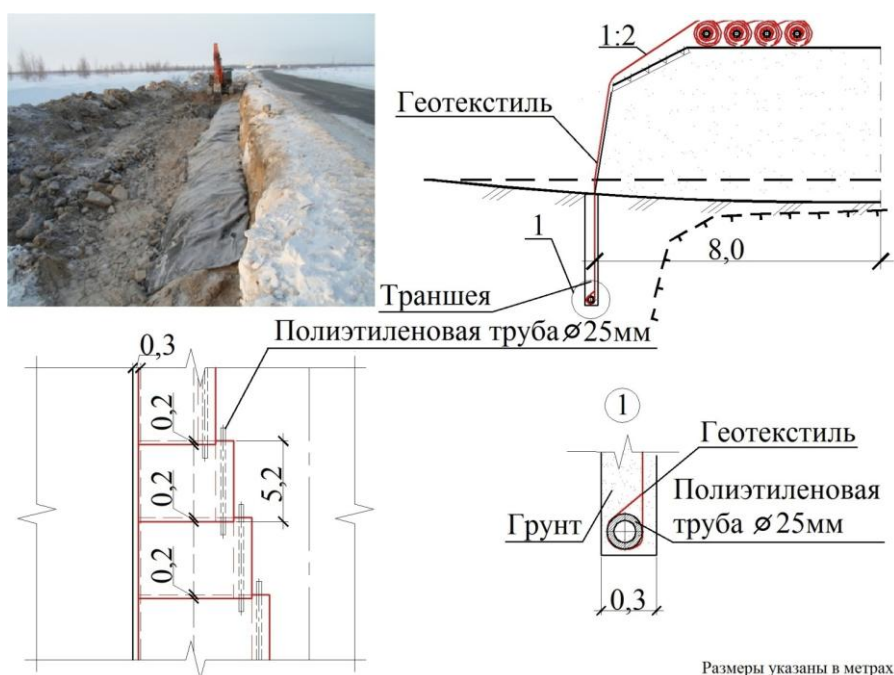


Рисунок 2. Схема и фото установки геотекстиля в траншею на рассматриваемом участке

В феврале-марте 2013г. при выполнении земляных работ по реализации предложенного КТР в откосной части ЗП была зафиксирована и измерена скорость фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» (см. рис. 3). Формирование уплотненного слоя торфа на границе «ЗП-основание» обусловлено возведением ЗП по технологии «от себя». Причиной появления фильтрации воды через уплотненный слой торфа под подошвой ЗП является не замерзающие в холодный период ПДСВ вдоль откосной части ЗП. Разница температур воды в начале и конце пути фильтрации воды составила 1,8-2,4°C, расход воды составил 0,005м³/ч. Кроме того была зафиксирована толщина талого торфа в основании дороги (см. рис. 4). В технологической траншее под влиянием фильтрации через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» был отмечен и измерен объем скопившейся воды (см. рис. 5).



Рисунок 3. Фильтрация воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» (февраль-март 2013г.)



Рисунок 4. Толща талого торфа в основании автодороги (февраль-март 2013г.)

Для измерения вертикальных перемещений грунтовых слоев в основании и теле ЗП были установлены винтовые марки. Перемещения марок по вертикали фиксировались прогибомерами с индикатором часового типа ИЧ-1 с ценой деления 0,01мм. Для замера температуры грунтов по глубине (см. рис. 7) на расстоянии 8,30м от продольной оси дороги в откосах были устроены термоскважины глубиной $h=10$ м, в которые помещали трубки диаметром $d=57$ мм (см. рис. 6).



Рисунок 5. Скопление воды в технологической траншее



Рисунок 6. Замер температуры в термоскважине

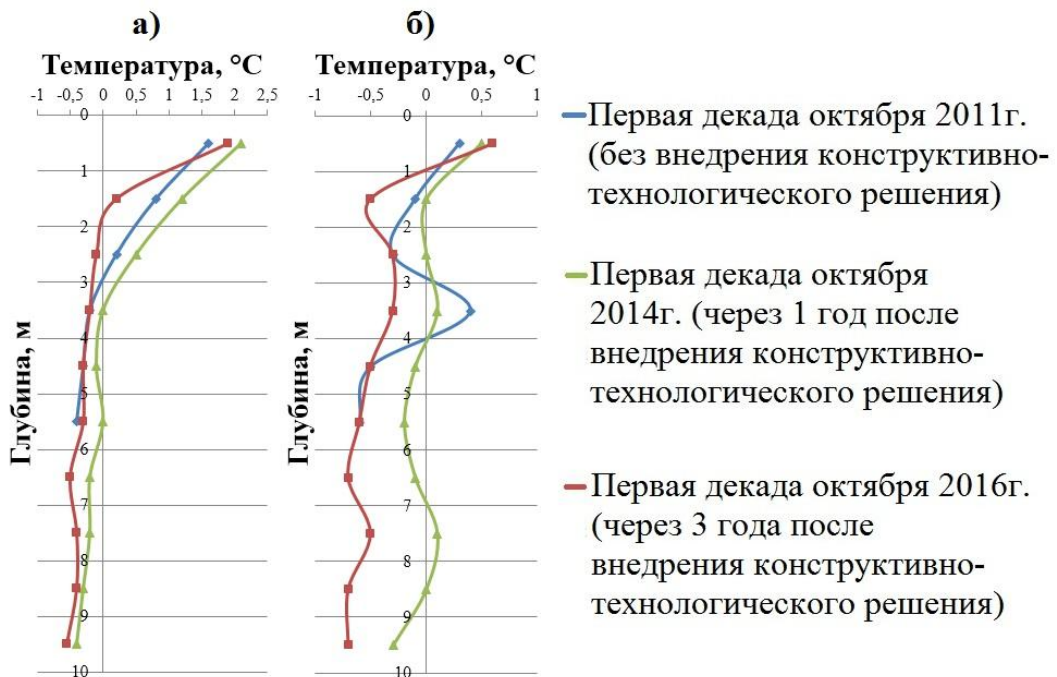


Рисунок 7. График распределения температуры грунтов по глубине в термоскважинах, расположенных в южном (а) и северном (б) откосе ЗП

Повышение температуры грунтов в южной откосной части ЗП через один год после внедрения КТР (на 2014г.) связано с дополнительным поступлением теплоты от солнечной радиации в толщу грунтов откосной части ЗП и основания при устройстве КТР в начале весеннего периода (март 2013г.).

Анализ полученных результатов натурного исследования позволил сделать следующие выводы:

1. Основной причиной развития деформаций конструкции автодороги является влияние ПДСВ и фильтрация воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» при воздействии незамерзающих ПДСВ вдоль откосов, которое сопровождается растеплением грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания.

2. Внедренное КТР позволило снизить глубину оттаивания грунтов многолетнемерзлого основания в южной подоткосной части, тем самым снизить развитие циклических деформаций ЗП и основания автодороги. Согласно данным мониторинга под южным откосом ЗП на 2016г. грунты основания оттаяли до глубины 2м под серединой дневной поверхности откоса, что меньше на 1м глубины оттаивания грунтов в 2011г. Под северным откосом ЗП за период 2011-2016гг. по всей глубине термоскважины зафиксировано понижение температуры грунтов в диапазоне значений 0,5-1,0°C.

3. С учетом выявленного дополнительного теплового источника воздействия на грунты ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги предложено разработать КТР, направленное на температурную стабилизацию грунтов геотехнической системы «ЗП-основание». В качестве армирующего материала предложено использовать водонепроницаемый геосинтетический материал, что позволит сформировать противофильтрационный экран в толще грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания. Для ограничения теплового влияния ПДСВ через откосную часть ЗП предложено использовать тепловой экран, сформированный гранулированным теплоизоляционным материалом.

В третьей главе описана методика расчета по определению глубины промерзания-оттаивания многолетнемерзлого основания при квазистационарном потоке тепла за счёт фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» и при влиянии ПДСВ вдоль откосов ЗП.

В основу методики положен аналитический метод, представленный формулой Стефана, основываясь на решении Гольдмана В.Г. (1951) и на теоретическом представлении теплового взаимодействия насыпи с многолетнемерзлыми основаниями, изложенными в работе Хрусталева Л.Н., Ашпиза Е.С. (2008).

Для прогноза процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ были составлены уравнения радиационного баланса в период теплого и холодного времени. При разных условиях теплопередачи на основной площадке и откосной части ЗП было предложено отдельно представить уравнения радиационного баланса. К разности условий следует отнести наличие на откосной части и отсутствие на основной площадке ЗП: отложения снега в холодный период и скопление ПДСВ в теплый период. Следует также учесть экспозицию откоса ЗП. На рисунке 8 показана схема для предлагаемой методики расчета.

Для теплого периода года уравнение радиационного баланса на основной площадке ЗП записывается как:

$$Q_{s1,th} + \frac{Q_{w,th}}{2} = Q_{\phi 1,f}, \quad (3.1)$$

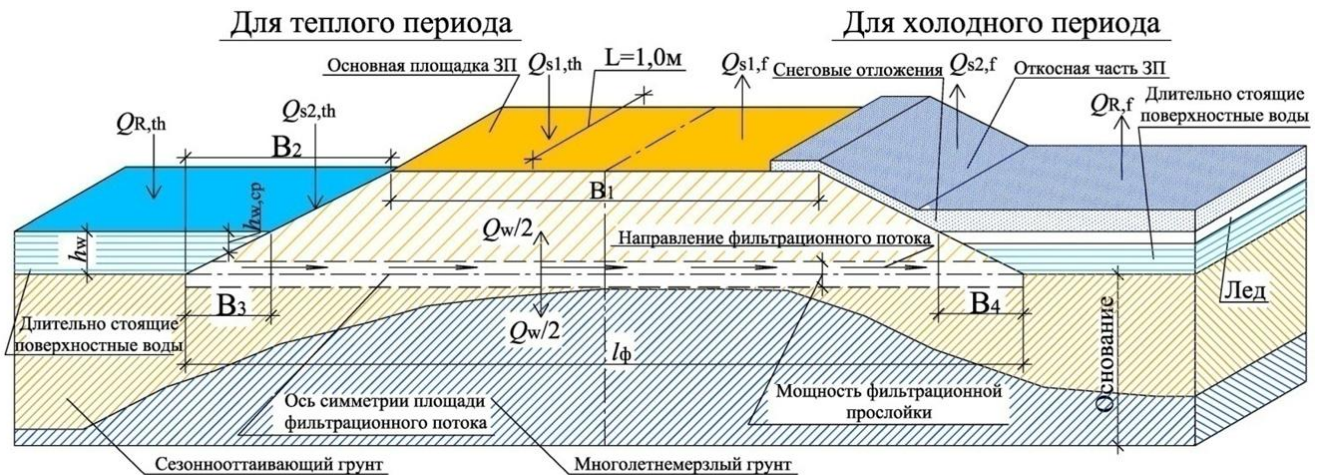
$$d_{th1} \cdot L_v \cdot B_1 \cdot L + \frac{q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_{th}}{2} = L_v \cdot l_{\phi 1} \cdot z_{th1} \cdot L, \quad (3.2)$$

$$d_{th1} = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot (T_{th1} - T_{bf}) \cdot t_{th}}{L_v} + (\lambda_{th} \cdot R_{th})^2 - \lambda_{th} \cdot R_{th}}. \quad (3.3)$$

Уравнение радиационного баланса на откосной части ЗП записывается в теплый период года как:

$$Q_{s2,th} + \frac{Q_{w,th}}{2} - Q_{R,th} = Q_{\phi 2,f}, \quad (3.4)$$

$$d_{th2} \cdot L_v \cdot B_2 \cdot L + \frac{q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_{th}}{2} - (d_{th2} - d_{th3}) \cdot L_v \cdot B_3 \cdot L = L_v \cdot l_{\phi 2} \cdot z_{th2} \cdot L. \quad (3.5)$$



$Q_{s1,th}$, $Q_{s2,th}$ – количество тепла, поступающее из атмосферы через основную площадку и откосную часть ЗП в грунт основания и ЗП дороги соответственно, Вт·ч; Q_w – количество тепла, передаваемое при фильтрации воды через тело ЗП дороги (на границе ЗП – основание), Вт·ч; $Q_{R,th}$ – количество тепла, поступающее из атмосферы в ПДСВ, Вт·ч; $Q_{s1,f}$, $Q_{s2,f}$ – количество тепла, поглощаемое атмосферой из грунта основания и ЗП через основную площадку и откосную часть ЗП дороги соответственно, Вт·ч; $Q_{R,f}$ – количество тепла, поступающее из грунта в ПДСВ и ледяную прослойку в атмосферу, Вт·ч; B_1 – ширина основной площадки ЗП, м; L – элементарная длина автомобильной дороги, равная 1 м; B_2 – длина откосной части ЗП, м; B_3 – размер участка влияния длительно стоящих вод на откос ЗП, м; B_4 – размер участка влияния длительно стоящих вод и льда на откос ЗП на конец холодного периода, м; $h_{w,cp} = h_w/2$ – толщина слоя длительно стоящих вод вдоль откосов ЗП, м

Рисунок 8. Схема для предлагаемой методики расчета

Величина d_{th2} и d_{th3} рассчитываются по формуле 3.3 с использованием средней температуры за теплый период на поверхности откосной части ЗП (T_{th2} , °C). Термическое сопротивление воды следует принимать из отношения средней толщины ПДСВ $h_{w,cp}$ вдоль откосов к их коэффициенту теплопроводности λ_w .

Для холодного периода года при передаче тепла через основную площадку ЗП уравнение

радиационного баланса представлено как:

$$Q_{s1,f} + \frac{Q_{w,f}}{2} = Q_{\phi1,th}, \quad (3.6)$$

$$d_{f1} \cdot L_v \cdot B_1 \cdot L + \frac{q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_f}{2} = L_v \cdot l_{\phi1} \cdot z_{f1} \cdot L, \quad (3.7)$$

$$d_{f1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot (T_{f1} - T_{bf}) \cdot t_f}{L_v} + (\lambda_f \cdot R_f)^2} - \lambda_f \cdot R_f. \quad (3.8)$$

Для холодного периода года при передаче тепла через откосную часть ЗП уравнение радиационного баланса представлено как:

$$Q_{s2,f} + \frac{Q_{w,f}}{2} + Q_{R,f} = Q_{\phi2,th}, \quad (3.9)$$

$$d_{f2} \cdot L_v \cdot B_1 \cdot L + \frac{q_w \cdot C_w \cdot (T_{w,1} - T_{w,2}) \cdot t_f}{2} + (d_{f2} - d_{f3}) \cdot L_v \cdot B_4 \cdot L = L_v \cdot l_{\phi2} \cdot z_{f2} \cdot L, \quad (3.10)$$

где $Q_{\phi1,f}, Q_{\phi2,f}$ – количество тепла, поглощаемое промерзшим грунтом основания и ЗП дороги при передаче тепла через основную площадку и откосную часть ЗП соответственно, Втч;

$Q_{\phi1,th}, Q_{\phi2,th}$ – количество тепла, отдаваемое грунтом основания и ЗП в атмосферу через основную площадку и откосную часть ЗП соответственно, Втч;

d_{f1}, d_{f2}, d_{f3} и $d_{th1}, d_{th2}, d_{th3}$ – соответственно глубина промерзания-оттаивания грунта ЗП и основания дороги при передаче тепла: через основную площадку; через откосную часть; под слоем ПДСВ вдоль откосов, м;

L_v – удельная теплота промерзания–оттаивания грунта, Втч/м³;

$\mu = 1 + 0,033T_0$ – эмпирическая поправка, которая учитывает отток тепла в подстилающий слой сезонного оттаивания ММГ (T_0 – температура ММГ, °С);

R_f, R_{th} – среднее термическое сопротивление теплообмену на поверхности основной площадки и (или) откосов ЗП за холодный и теплый период, м²°С/Вт;

λ_{th}, λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлого и талого грунта, Вт/м°С;

T_{f1}, T_{th1} – средняя температура за холодный и теплый период на поверхности основной площадки ЗП, °С;

T_{bf} – температура начала замерзания-оттаивания грунта, °С;

t_f, t_{th} – продолжительность холодного и теплого периода, ч;

q_w – расход воды через тело ЗП, м³/ч;

C_w – теплоемкость воды, Втч/(м³°С);

T_{w1}, T_{w2} – температура воды в начале и конце пути фильтрации соответственно, °С;

z_{f1}, z_{f2} и z_{th1}, z_{th2} – соответственно глубина промерзшего и оттаявшего грунта ЗП и основания при передачи тепла через основную площадку ЗП и через откосную часть ЗП, м.

Предлагаемой методикой расчета возможно определить значения глубины промерзания-оттаивания грунта в откосной части ЗП при воздействии фильтрационной прослойки и ПДСВ в первый год эксплуатации автодороги. Для выполнения прогноза величин промерзания-оттаивания грунта на период эксплуатации автодороги предложено задаться критериями оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги на расчетный период. Критерием оценки температурной стабилизации ЗП и основания автодороги предложено принять отношение глубины оттаивания к глубине промерзания. Если в середине подоткосной части ЗП выполняется условие $\frac{z_{th}}{z_f} \leq 1$, то процесс деградации ММГ

отсутствует, КТР не требуется. В противном случае $\frac{z_{th}}{z_f} > 1$ – процесс деградации ММГ присутствует, необходимо разработать и внедрить дополнительные стабилизационные мероприятия.

С целью верификации выполнено сравнение предлагаемой методики расчета с численным моделированием в программе QFrost. Объектом моделирования и расчета принят натурный экспериментальный участок п.Пангоды – п.Правохеттинский. Моделирование выполнялось на период 1 год и 20 лет. Расчет на период 1 год позволил определить и сопоставить значения глубины промерзания-оттаивания в откосной части ЗП по предлагаемой методике и численным методом (см. рис. 9). Расчет на период 20 лет соответствовал сроку эксплуатации натурального участка автодороги и позволил сопоставить принятые критерии оценки температурной стабилизации ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги. Результаты моделирования сопоставлялись с данными замеров температуры массива грунтов в южной откосной части ЗП рассматриваемого участка дороги (см. рис. 10).

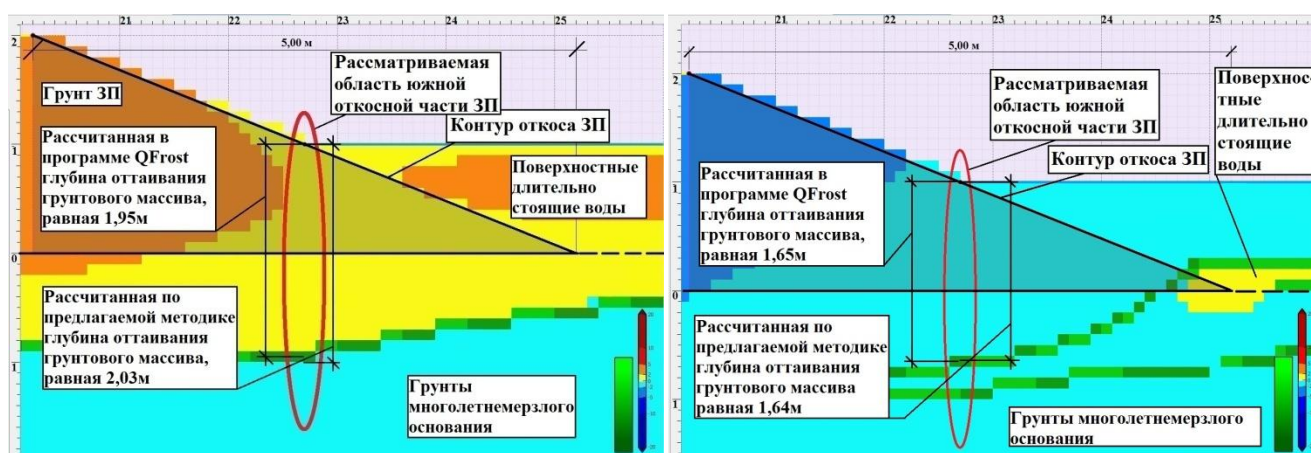


Рисунок 9. Сравнение результатов глубины промерзания-оттаивания грунтов откоса ЗП предлагаемой методикой расчета с численным моделированием на период 1 год

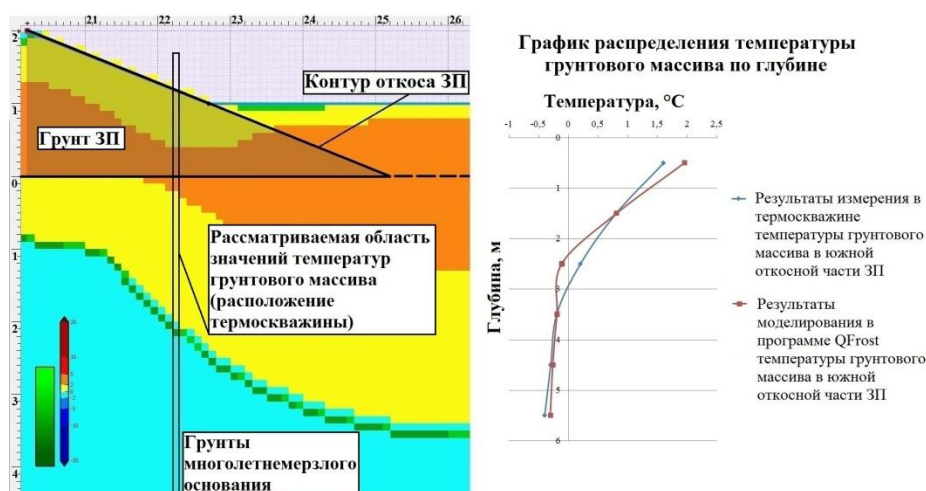


Рисунок 10. Сравнение результатов глубины промерзания-оттаивания грунтов откоса ЗП численным моделированием на период 20 лет с данными замера температуры

Критерий оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания натурального участка автодороги в откосной части ЗП на период эксплуатации дороги по предлагаемой методике составил

$$\frac{z_{th, метод}}{z_{f, метод}} = \frac{2,03}{1,64} = 1,24 > 1; \quad \text{при}$$

численном моделировании

$$- \frac{z_{th, числ}}{z_{f, числ}} = \frac{1,95}{1,65} = 1,18 > 1.$$

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана методика расчета для прогноза процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ. Разработанной методикой определяются глубины промерзания-оттаивания многолетнемерзлого основания автодороги при квазистационарном потоке тепла с учетом фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» и при влиянии ПДСВ вдоль откосов, с учетом влияния КТР.

2. Результаты расчета значений глубины промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при воздействии фильтрационной прослойки через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» по предлагаемой методике показали высокую сходимость с результатами численного моделирования, выполненного в программе QFrost, и данными мониторинга рассматриваемого участка дороги. Погрешность полученного значения глубины промерзания-оттаивания грунтового массива предлагаемой методикой относительно численного моделирования составила в пределах 10%; численным моделированием относительно натуральных замеров – 18,4%.

3. На основе разработанной методики предложены критерии оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги. Полученные при расчете критерии оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги корректно описывают процесс промерзания-оттаивания грунтов ЗП и основания на натурном участке. Согласно натурным наблюдениям и результатам расчета по предлагаемой методике на данном участке требуется внедрение дополнительных стабилизационных мероприятий для предотвращения дальнейшего оттаивания грунтов основания в откосной части ЗП.

Четвертая глава посвящена экспериментально-теоретическому обоснованию

геометрических параметров предложенного КТР и лабораторным исследованиям температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги при влиянии ПДСВ вдоль откосов ЗП.

Для участков автодорог с вероятностным подтоплением вдоль откосов ЗП предложено КТР по устройству автодорог на ММГ, возведенных по первому принципу проектирования (см. рис. 11). В рассматриваемом КТР предлагается расположить в подоткосной части насыпи в водонепроницаемых геоконтейнерах и в основании автодороги гранулированный теплоизоляционный материал (ГТМ) выше прогнозируемого уровня ПДСВ. Предлагается разместить полубойму из водонепроницаемого геосинтетического материала в теле насыпи и в основании автодороги для гидроизоляции ГТМ. С целью снижения влияния ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в основании автодороги выполняются работы по устройству продольных траншей с дальнейшим вертикальным размещением в них водонепроницаемого геосинтетического материала и ГТМ.

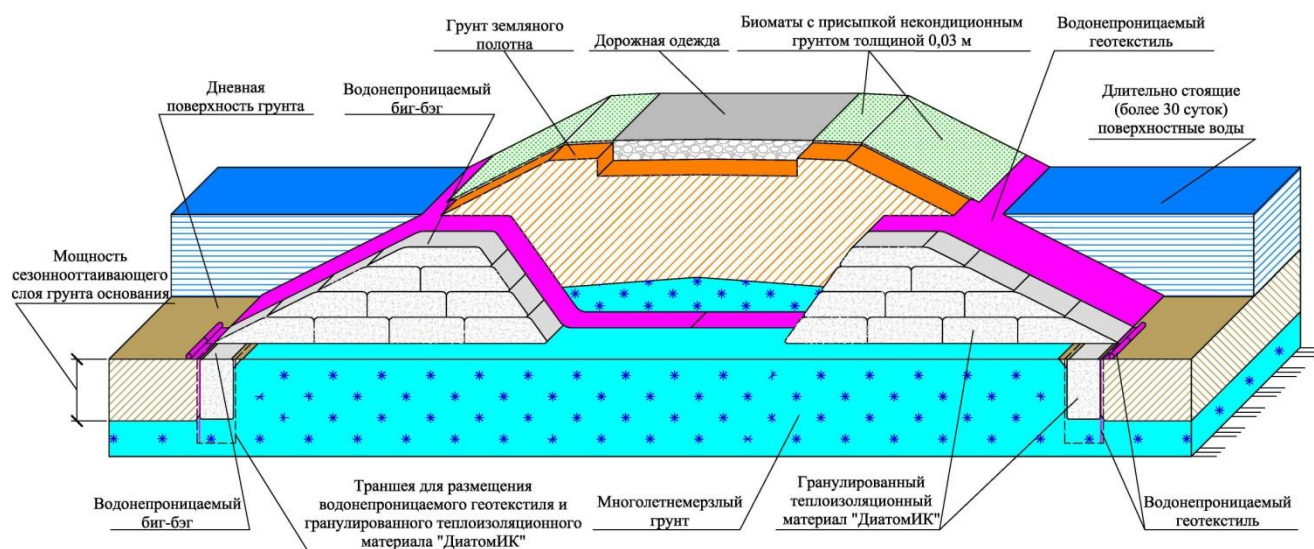


Рисунок 11. Схема КТР конструкции автодороги на ММГ с подтопляемыми откосами вдоль ЗП

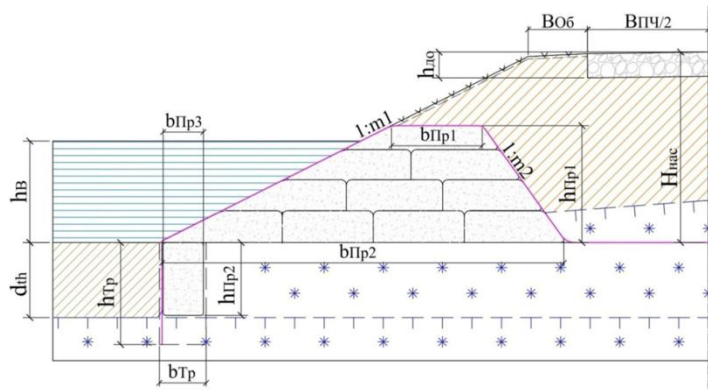
На основании серии численных экспериментов были обоснованы геометрические параметры предлагаемого КТР (см. рис. 12).

Серии численного моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги проводились в три этапа:

1. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,0\text{м}$; высотой слоя ПДСВ $h_{\text{в}}=0,5\text{м}$.

2. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=1,5\text{м}$; высотой слоя ПДСВ $h_{\text{в}}=0,75\text{м}$.

3. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с высотой насыпи $H_{\text{нас}}=2,0\text{м}$; высотой слоя ПДСВ $h_{\text{в}}=1,0\text{м}$.



h_B – высота ПДСВ; $h_{Тр}$ – глубина траншеи; $d_{тн}$ – мощность сезоннооттаивающего слоя грунта основания; $1:m_1$ – заложение откоса насыпи; $1:m_2$ – заложение откоса теплоизоляционной призмы в теле насыпи

Рисунок 12. Геометрические параметры предлагаемого КТР

В качестве вариативных геометрических параметров рассматривались: $B_{ПЧ}$; $B_{Об}$; $b_{Пр1}$; $b_{Пр2}$; $b_{Пр3}$; $h_{Пр1}$; $1:m_1$; $1:m_2$. Границы вариативных параметров принимались для $B_{ПЧ}=7,0\div 6,0$ м; $B_{Об}=5,0\div 4,0$ м; $b_{Пр1}=0,5\div 2,0$ м; $b_{Пр2}=2,3\div 7,5$ м; $b_{Пр3}=0,2\div 0,6$ м; $h_{Пр1}=0,6\div 1,1$ м; $1:m_1=1:2\div 1:3$; $1:m_2=1:1\div 1:3$.

Для оценки влияния на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при назначении геометрических параметров КТР была выбрана характерная точка в геотехнической системе «ЗП-основание» дороги. По результатам численных экспериментов характерной точкой отражающей температурный режим многолетнемерзлого основания является точка, расположенная в основании насыпи под бровкой ЗП, которая отражает температурный режим верхней границы ММГ. На каждом этапе численного моделирования фиксировалась температура в характерной точке.

На рисунке 13 представлены графики изменения параметров $b_{Пр1}$ и $b_{Пр2}$ в зависимости от температуры грунта в характерной точке измерения на 1-ый год эксплуатации автодороги при высотах насыпей $H_{нас}=1,0; 1,5; 2,0$ м и заложении внутреннего откоса теплоизоляционной призмы 1:1; 1:2; 1:3. По результатам численных экспериментов установлено:

1. Минимальная ширина траншеи, позволяющая исключить влияние ПДСВ на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания, составляет не менее 0,2м при использовании ГТМ с теплофизическими характеристиками $\lambda=0,1$ Вт/(м³°С), $C=576$ кДж/(м³°С). Минимальную глубину траншеи следует принимать равной глубине сезоннооттаивающего слоя грунта основания, для обеспечения заземления водонепроницаемого геосинтетического материала в верхней кровле многолетнемерзлого основания. Высота теплоизоляционной призмы в теле насыпи следует назначать выше уровня ПДСВ вдоль откосов ЗП на 0,1м.

2. Заложение внутренних откосов теплоизоляционной призмы в теле насыпи 1:2 в сравнении с заложением 1:1 приводит к снижению расхода теплоизоляционного материала на 18÷22% при сохранении отрицательного значения температуры в характерной точке в течение первого года эксплуатации автомобильной дороги. Заложение внутренних откосов

теплоизоляционной призмы в теле насыпи 1:3 в сравнении с заложением 1:2 приводит к увеличению расходов строительных материалов при максимальном снижении температуры в характерной точке на $0,2^{\circ}\text{C}$. Заложение внутренних откосов теплоизоляционной призмы в теле насыпи следует принимать равным 1:2.

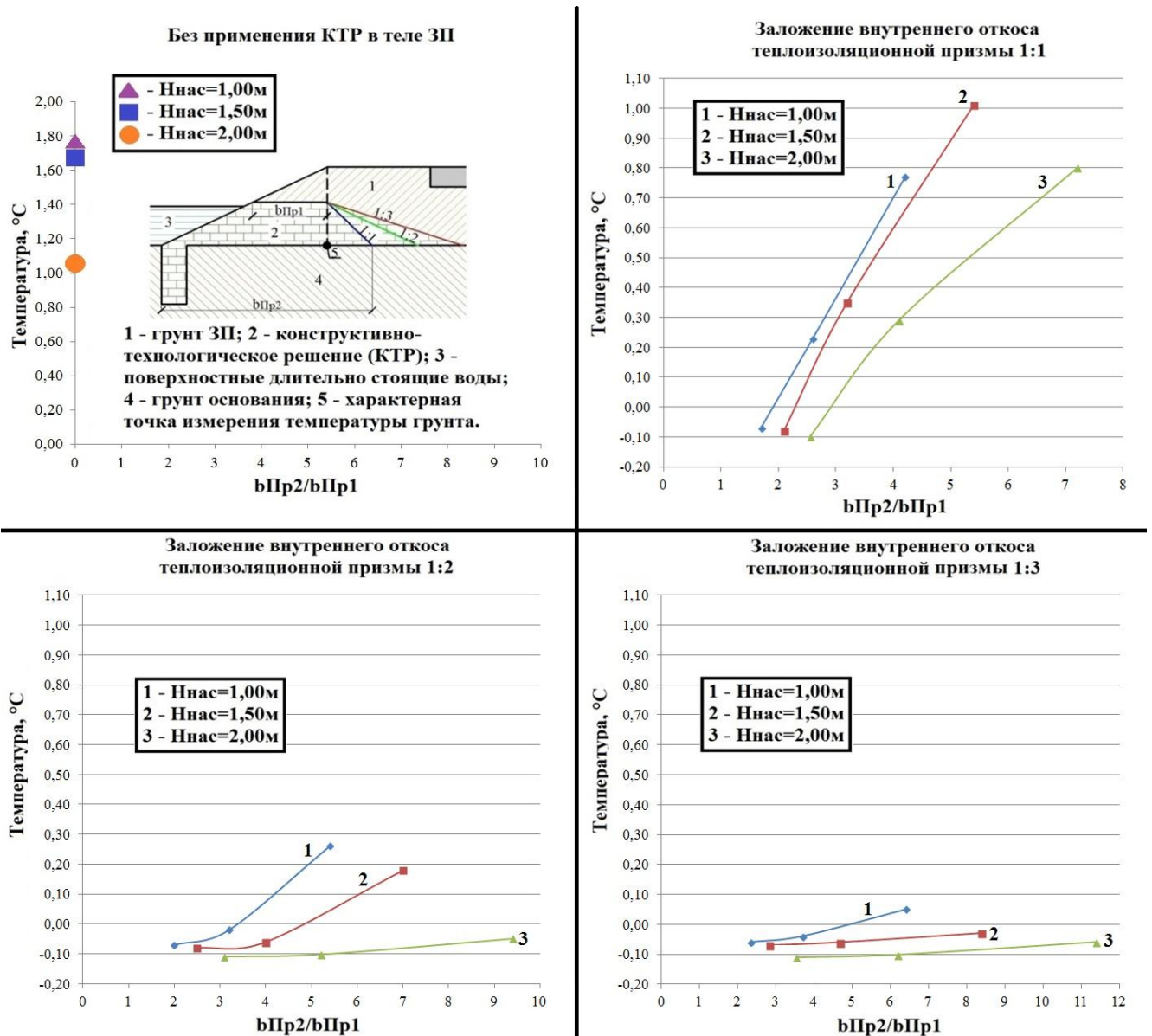


Рисунок 13. Изменение параметров $b_{Пр1}$ и $b_{Пр2}$ в зависимости от температуры грунта в характерной точке измерения на 1-ый год эксплуатации автодороги на конец теплого периода при высотах насыпей $H_{нас}=1,0; 1,5; 2,0\text{м}$ и заложении внутреннего откоса теплоизоляционной призмы 1:1; 1:2; 1:3

Для определения эффективности предложенного КТР проведены лабораторные исследования на маломасштабном стенде (см. рис. 14). Для выполнения маломасштабных экспериментов был принят геометрический масштаб 1:30, временной масштаб 1:900 соответственно к размерам и времени моделируемого натурального объекта.

Серии экспериментального моделирования в лабораторных условиях температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги проводились в три этапа:

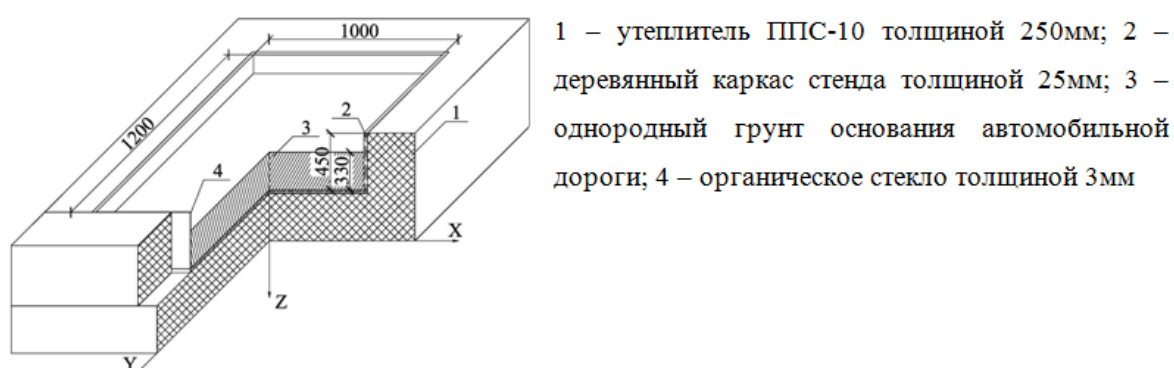
1. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания в закрытой системе (без

подтока воды и имитации снеговых отложений);

2. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с подтопляемыми откосами вдоль ЗП и имитацией снеговых отложений;

3. Моделирование грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания с подтопляемыми откосами вдоль ЗП, имитацией снеговых отложений и предложенным КТР.

На каждом этапе эксперимента первоначально моделировалось промерзание-оттаивание грунта основания дороги в закрытой системе для формирования толщи ММГ. В качестве грунтового основания использовался суглинок нарушенной структуры. По предварительным расчетам и проведенным испытаниям было установлено, что для формирования циклического повторения значения мощности деятельного слоя было принято 10 периодов попеременного промерзания и оттаивания экспериментального стенда.



1 – утеплитель ППС-10 толщиной 250мм; 2 – деревянный каркас стенда толщиной 25мм; 3 – однородный грунт основания автомобильной дороги; 4 – органическое стекло толщиной 3мм

Рисунок 14. Схема экспериментального стенда для моделирования температурных условий основания автодороги и ЗП в масштабе к моделируемому объекту 1:30

Физические и теплофизические характеристики грунта моделируемого основания и ЗП на разных этапах приведены в таблице 1. По предварительным расчетам и проведенным испытаниям было установлено, что для формирования циклического повторения температуры грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги в одних и тех же точках рассматриваемого пространства достаточно принять 10 периодов попеременного промерзания и оттаивания экспериментальной модели.

Таблица 1. Физические и теплофизические характеристики грунта моделируемого основания и ЗП на разных этапах

Наименование	Значение для трех этапов моделирования основания	Значение для трех этапов моделирования ЗП
$\rho_d, \text{кг/м}^3$	1508	1508
$W_{tot}, \%$	30	14
$\lambda_f, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	1,65	1,07
$\lambda_{th}, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	1,45	0,95
$C_f, \text{кДж/(м}^3\text{}^\circ\text{C)}$	2805,6	1879,85
$C_{th}, \text{кДж/(м}^3\text{}^\circ\text{C)}$	3332,7	2319,3
$L_v, \text{МДж/м}^3$	116,51	62,0

При моделировании температурных условий на каждом этапе эксперимента был осуществлен переход от нестационарного температурного режима к квазистационарному с

принятием в расчете средних по многолетним данным температуры воздуха г.Надым за период отрицательных и положительных температур: соответственно $T_{f,m}=-14,8^{\circ}\text{C}$ и $T_{th,m}=+10^{\circ}\text{C}$ (с учетом радиационной составляющей).

Модели ЗП были заданы следующие размеры: ширина – 0,4м; высота – 0,066м; заложение откосов – 1:1,5. На рисунках 15 и 16 показан экспериментальный стенд в лабораторных условиях на период оттаивания и промерзания.

Устройство ЗП производилось в период промерзания деятельного слоя основания. На 2-ом и последующих этапах моделировались ПДСВ и снежный покров на откосах ЗП и придорожных полосах. Высота слоя ПДСВ от уровня дневной поверхности составил 3,33см, что соответствовало 1,0м толщи ПДСВ при натуральных измерениях.

Для моделирования теплового влияния фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание», формируемый при возведении ЗП по технологии «от себя» был замоделирован уплотненный слой торфа с коэффициентом фильтрации $k_f=1,20\text{м/сут}$ и толщиной 0,67см.

На 3-ем этапе при моделировании КТР использовался ГТМ «ДиатомИК» со следующими теплофизическими свойствами: $\lambda=0,1\text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$, $C=576\text{кДж}/(\text{м}^3\text{C})$. В качестве водонепроницаемого геотекстиля и материала для геоконтейнеров применялся гидроизоляционный материал «Теплонит 600».

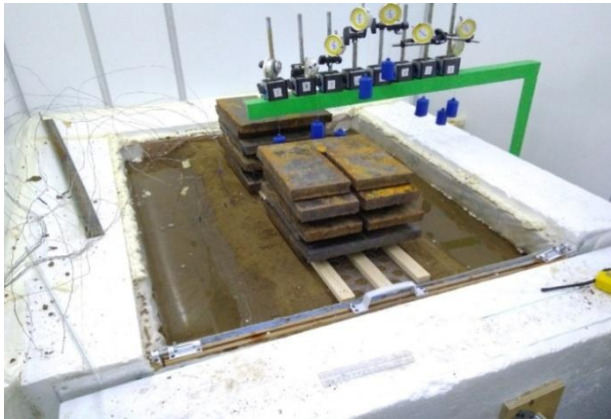


Рисунок 15. Экспериментальный стенд в лабораторных условиях на период оттаивания

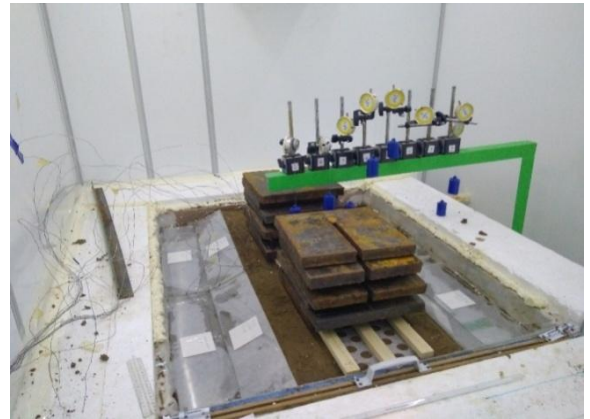


Рисунок 16. Экспериментальный стенд в лабораторных условиях на период промерзания

С целью верификации по окончании каждого этапа экспериментального моделирования в лабораторных условиях полученные значения отношения глубины оттаивания к глубине промерзания на период 1 год сопоставлялись с результатами численного моделирования и предлагаемой методики расчета (см. рис. 17). Для оценки эффективности предлагаемого КТР были составлены термограммы изменения температуры грунтов ЗП и основания 2-ого и 3-его этапа моделирования на окончание периода оттаивания по прошествии 1 и 10 циклов промерзания-оттаивания (см. рис. 18).

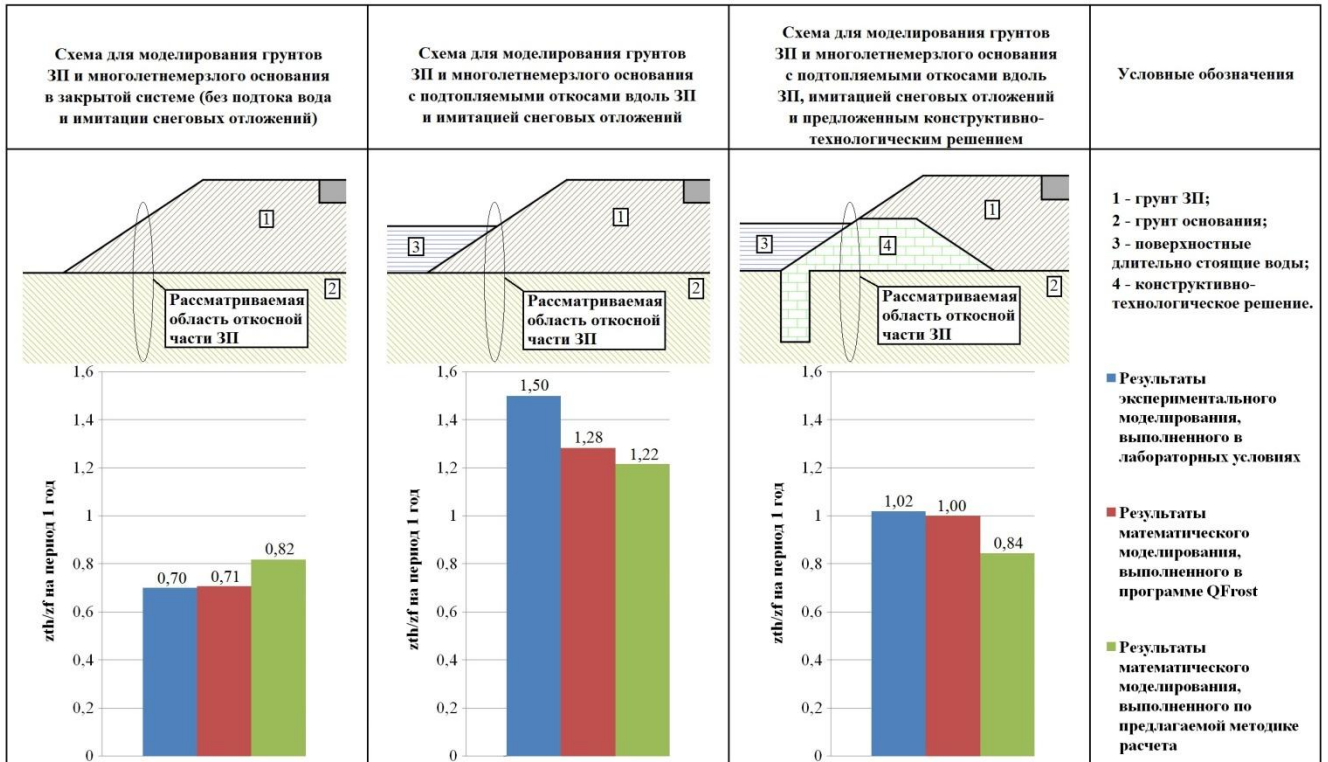
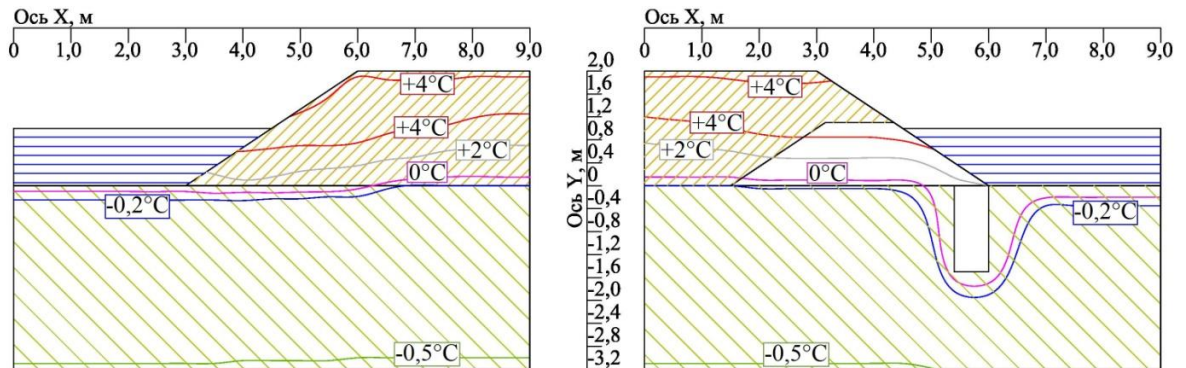


Рисунок 17. Сравнение значений отношения глубины оттаивания к глубине промерзания на период 1 год по предлагаемой методике с результатами экспериментального и численного моделирования маломасштабной модели грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания

Результаты 2-ого (слева) и 3-его (справа) этапов экспериментального моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания на конец теплого периода по прошествии 1-ого цикла промерзания-оттаивания



Результаты 2-ого (слева) и 3-его (справа) этапов экспериментального моделирования температурного режима грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания на конец теплого периода по прошествии 10-ого цикла промерзания-оттаивания

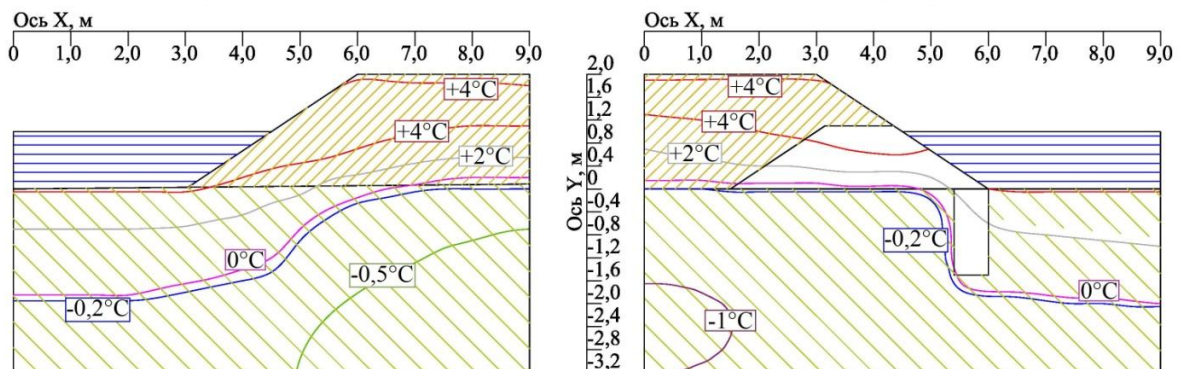


Рисунок 18. Термограммы изменения температуры грунтов ЗП и основания 2-ого и 3-его этапа моделирования на окончание периода оттаивания по прошествии 1 и 10 циклов промерзания-оттаивания

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Сопоставление результатов 1-ого этапа экспериментального моделирования с натурными исследованиями позволило оценить влияние этих факторов на температурный режим грунтов.

2. Результаты экспериментального моделирования на 2-ом этапе показали высокую сходимость с результатами натуральных наблюдений. Превышение глубины оттаивания грунтового массива в откосной части ЗП к глубине промерзания на первом цикле в эксперименте 1,50 раза, по предлагаемой методике расчета в 1,22 раза, что указывает на необходимость разработки и внедрения дополнительных стабилизационных мероприятий.

3. Экспериментальное моделирование предложенного КТР (3-ий этап) способствует поднятию кровли ММГ к подошве насыпи в середине ее подоткосной части на конец теплого периода 10-ого цикла на 4,67см, что соответствует 1,40м в масштабе 1:1. Температура грунта насыпи в середине ее подоткосной части на конец теплого периода 10-ого цикла на границе ЗП и многолетнемерзлого основания снизилась на 2,50°С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры в зоне Арктики. Выполнен анализ зарубежного и отечественного опыта по стабилизации температурного режима ЗП и основания автодороги на ММГ. Рассмотрены методы прогноза температурных процессов и способы управления температурным режимом в грунтах конструкций линейных сооружений на ММГ. В результате проведенного анализа была сформирована гипотеза диссертационного исследования.

2. Выполнено исследование температурного режима грунтов ЗП и основания участка автодороги «п.Пангоды (км877+210) – п.Правохеттинский (км877+300), ПК594+00 – ПК594+90» на ММГ при влиянии ПДСВ. Установлено, что при непрерывном воздействии ПДСВ вдоль откосов ЗП формируется фильтрационная прослойка на границе «ЗП-основание». Фильтрационная прослойка в совокупности с ПДСВ способствует понижению кровли ММГ в основании ЗП.

3. Разработано КТР, стабилизирующее температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги при влиянии ПДСВ. Предложенное КТР ограничивает тепловое воздействие ПДСВ и прерывает фильтрационный и тепловой поток на границе «ЗП-основание». Внедрение КТР приводит к поднятию кровли ММГ до 1,40м и снижению температуры основания ЗП до 2,5°С на 10-ый цикл попеременного промерзания-оттаивания. Техническую новизну предложенного решения подтверждает полученный патент на изобретение №2732774.

4. Разработана методика расчета для прогноза процессов промерзания-оттаивания грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания при влиянии ПДСВ. Разработанной методикой

определяются глубины промерзания-оттаивания многолетнемерзлого основания автодороги при квазистационарном потоке тепла с учетом фильтрации воды через слой уплотненного торфа на границе «ЗП-основание» и при влиянии ПДСВ вдоль откосов, с учетом влияния КТР. На основании разработанной методики предложены критерии оценки температурной стабилизации грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания для принятия решения о необходимости разработки и внедрения стабилизационных мероприятий.

5. Проведена верификация разработанной методики расчета с результатами численного моделирования и данными мониторинга природных участков автодорог. Погрешность полученного значения глубины промерзания-оттаивания грунтового массива предлагаемой методикой относительно численного моделирования составила в пределах 10%; численным моделированием относительно природных замеров – 18,4%. Отношение глубины оттаивания к глубине промерзания по предлагаемой методике расчета на 1 год составило $\frac{z_{th,метод}}{z_{f,метод}} = 1,21 \div 1,32 > 1$,

отношение глубины оттаивания к глубине промерзания на природных участках на 20 лет составило $\frac{z_{th,натура}}{z_{f,натура}} = 1,52 \div 1,68 > 1$, что подтверждается циклическим проявлением дефектов на покрытии и обочинах экспериментального участка дороги в период ее эксплуатации, и указывает на необходимость назначения дополнительных мероприятий по температурной стабилизации.

6. Экспериментально-теоретически обоснованы основные геометрические параметры предлагаемого КТР. Выявлена зависимость изменения геометрических параметров КТР на температурный режим грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автодороги.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: исследование и разработка метода прогноза температурного режима и напряженно-деформированного состояния грунтов ЗП и многолетнемерзлого основания автомобильной дороги при использовании первого и второго принципа проектирования автомобильных дорог.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий:

1. Макаров А.С., Краев А.Н., Твердохлеб С.А., Шанхоев З.Ш. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования плоскопараллельного промораживания образца грунта в экспериментальном стенде // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/09TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/09TS417.

2. Макаров А.С., Краев А.Н. Обоснование геометрического и временного масштаба модели автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах в лабораторных условиях //

Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/15SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS218.

3. Макаров А.С., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш. Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №4, <https://t-s.today/PDF/17SATS418.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/17SATS418.

В других изданиях:

4. Макаров А.С., Краев А.Н. Использование некондиционных грунтов в теле насыпи автомобильных дорог в условиях вечной мерзлоты // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ – В 2-х т. – Т. I. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2015. – С. 79-85.

5. Макаров А.С., Шанхоев З.Ш., Земеров И.В., Скворцов Д.С. Анализ масштабного фактора при моделировании автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции / Т. 4. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 256-259.

6. Шанхоев З.Ш., Макаров А.С., Пермитина Т.В. Системы мониторинга автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах в рамках реализации проекта «Умные дороги» // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции / Т. 5. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 335-337.

7. Макаров, А. С. Лабораторные экспериментальные исследования температурного режима земляного полотна и основания автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах / А. С. Макаров // Новые технологии - нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции. В IV т. Т. III. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 237-240.

Патент:

8. Автомобильная дорога на многолетнемерзлых грунтах: пат. 2732774 Рос. Федерация. № 2019135385; заявл. 05.11.2019; опубл. 22.09.2020, Бюл № 27. – 11с.